

基于改进正交设计的山区弃土场边坡稳定性敏感分析

张家铭, 付金丹, 刘浩

中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074

摘要 结合宜巴高速公路郑家垭隧道进口弃土场典型实例,在常规正交试验设计分析的基础上,引入基于灰色关联法的改进正交设计法,并运用 Flac3d 数值模拟软件,对该区域弃土场边坡稳定性的 6 种影响因素进行分析,找到影响该处边坡稳定性的敏感因素。分析结果表明,该区域内弃土场边坡滑面处土体的强度参数以及边坡的临空面形态对其边坡稳定性影响较大,容重和坡率对弃土场边坡稳定性影响较小,结果与灰色关联法、主成分分析法结果一致。因此认为该改进的正交设计法得到的结果比较可靠。

关键词 山区弃土场;灰色关联法;改进的正交设计法;主成分分析法;敏感因素

中图分类号 U416.1

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.17.005

Sensitivity Factors of Mountain Spoil Field Slopes Stability Based on Improved Orthogonal Method

ZHANG Jiamin, FU Jindan, LIU Hao

Faculty of Engineering, China University of Geosceince, Wuhan 430074, China

Abstract The slopes of mountain spoil field located at the Zhengjiaya tunnel of the Yiba highway are taken as an example. The improved orthogonal analysis method based on the grey theory is introduced and then the numerical simulation software of Flac3d is used to analyze the sensitive factors which affect the stability of the mountain spoil field slopes. The result shows that strength parameters of the soil and the free surface shape are the highly significant influence factors which affect the stability of the mountain spoil field slopes in these areas. And the unit weight and slope rate have less influence on the stability of mountain spoil field slopes. The result is consistent with that of the gray method and the principal component analysis method. Therefore the results obtained from the improved orthogonal method are considered reliable.

Keywords mountain soil field; grey theory; improved orthogonal method; principal component analysis method; sensitive factors

0 引言

作为高速公路附属工程之一的弃土场,其工程建设对于公路工程的影响已经引起了人们的足够重视,已有许多弃土场工程各方面的研究^[1-7]。目前在弃土场建设中,山区弃土场边坡的稳定性对于工程建设的影响较大。不当施工产生的弃土边坡容易造成各种灾害事故,极大的影响当地居民的生产生活及所在地的工程建设。因此开展对其边坡稳定性敏感因素研究,初步判断边坡的可能破坏机制,寻求失稳的主导因素^[8],已成为山区弃土场工程建设的大势。

影响弃土场边坡变形和稳定性的因素众多,主要因素为弃土场边坡体本身的地形地貌、岩土体性质、岩土体结构面、

地下水、地震、工程影响等^[9-10],但是由于这些因素大部分具有不确定性特点,通过单因素分析法对每种因素进行可靠准确的定量分析,从而进行边坡稳定性敏感因素分析不仅工作量大,而且没有考虑到各个因素之间的相互影响,得到的结果并不合理。针对这一情况,近年来很多专家学者就边坡稳定性影响因素开展了相关研究,并取得了一定成果^[9-14]。本文针对正交试验分析法的弊端进行改进,并将改进的方法用于湖北省宜巴高速 21 标郑家垭隧道进口弃土场的稳定性影响因素分析中,最后把得出的结果与灰色关联法、主成分分析法的结果进行对比,分析改进方法的可行性,为其边坡设计和防护提供指导。

收稿日期:2012-05-15;修回日期:2012-06-05

基金项目:湖北交通运输厅科技项目(2011056041)

作者简介:张家铭,副教授,研究方向为地质工程,电子信箱:564844646@qq.com

1 常规的正交试验设计分析法

正交设计法是一种可靠的因素试验方法,它具有均匀分散性和整齐可比性两个特点^[15]。它按照一定的规律构造矩形表格,该表格实际上是满足一定条件的矩阵,一般记作 $L_n(r_1 \times r_2 \times \dots \times r_m)$ 。其中, L 为正交表; n 为正交表行数,即试验次数; m 为正交表的列数,即试验至多可以安排的因子数; r_m 为第 m 个因子的水平数。假设矩阵 $H=[h_{ij}]_{n \times m}$ 是一个 $L_n(r_1 \times r_2 \times \dots \times r_m)$ 型正交表,它必须满足下面 4 个条件。

(1) 对任意 $j \in \{1, 2, \dots, m\}, h_{ij} \in \{1, 2, \dots, r_j\} (i=1, 2, \dots, n)$ 。

(2) 在任意一列中,每个水平的重复次数相等,即对任意 $j \in \{1, 2, \dots, m\}, h_{ij}$ 出现的次数为 $n/r_j (i=1, 2, \dots, n)$; 对任意 $j_1, j_2 \in \{1, 2, \dots, m\}$, 且 $j_1 \neq j_2$, 则 $(h_{i j_1}, h_{i j_2})$ 出现的次数都等于 $n/r_{j_1} r_{j_2} (i=1, 2, \dots, n)$ 。

(3) 任意两列中,同行数字(水平)构成的数对包含着所有可能的数对,且每个数对重复次数相等。

(4) 每个因子占用一个列号,正交表的列数不能少于因子的个数;因子的水平个数要同因子所在列号的水平个数一致,即 r 水平因子应放在有 r 个水平的列号上,列号水平数 r 对应于因子水平个数。

设 A, B, \dots , 为不同的因素; r 为各因素水平数; A_i 为因素 A 的 i 水平值 $(i=1, 2, \dots, r)$; X_{ij} 为因素 j 的第 i 水平值 $(i=1, 2, \dots, r; j=A, B, \dots)$, 在 X_{ij} 下进行试验,得到正态分布的随机变量 Y_{ij} ; 在 X_{ij} 下进行 n 次试验得到 n 个试验结果 $Y_{ijk} (k=1, 2, \dots, n)$, 计算参数为

$$K_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n Y_{ijk}}{n} \quad (1)$$

式中, K_{ij} 为因素 j 在 i 水平下的统计参数, n 为因素 j 在 i 水平下的试验次数, Y_{ijk} 为因素 j 在 i 水平下第 k 个试验指标值。

采用式(2)计算评价因素显著性的参数极差 R_j ,

$$R_j = \max\{K_{1j}, K_{2j}, \dots\} - \min\{K_{1j}, K_{2j}, \dots\} \quad (2)$$

极差越大说明该因素水平改变对试验结果影响越大。一般而言,极差最大的因素也就是最敏感的因素。极差越小的因素虽不能说不敏感因素,但至少可确定当该因素在所选用范围内变化时,对该指标影响没有最敏感因素影响敏感。

2 边坡稳定性敏感因素分析的灰色关联分析法

灰色关联分析^[16]是灰色系统理论的一个组成部分,它可以在较为有限的数据库下,较精确地寻找各种比较因素与目标因素之间的关联性。关联性程度由关联度表示。计算得到的关联度越大,表明比较因素与目标因素的相关性越强。

具体步骤为首先对各因素序列进行数据处理,得到灰关联因子空间,然后获取序列间的差异信息,并计算差异信息的灰关联度,最后对灰关联度进行排序,得到因子间的序关系^[17]。目前,已有灰色关联法用于边坡稳定性影响因素分析^[18],并取得一定成果。该方法能够很好地对边坡稳定影响因素进行敏感性分析,把分析结果定量化,清楚地确定出各种影响

因素的主次关系,为边坡设计及治理提供可靠的评价依据。

3 改进的正交试验设计方法

对常规正交试验设计方法原理分析发现,所取各个因素参数量纲大部分情况下并不一致,各参数值的数量级也不一定相同,使得上述常规方法得到的安全系数不具有直接可比性,变化幅度值相差较大,其缺陷与单因素分析法相似。因此改进的正交试验设计法应针对其缺陷进行改进。

考虑到灰色关联法具有使序列具备“可比性”、“可接近性”、“极性一致性”等优点,因此该方法得到的结果充分考虑到各参数量纲不一致问题,计算结果的相对值即各个因素权重可以弥补正交试验设计中的量纲不一致的问题,因此认为改进的方法得到的结果更加可靠。假设灰色关联法得到的各个影响因素的灰关联度为 x_1, x_2, \dots, x_n , 计算得到的各个影响因素的权重为 q_1, q_2, \dots, q_n 。利用式(3)计算可得权重值。

$$q_n = \frac{X_n}{X_1 + X_2 + \dots + X_n} \quad n=1, 2, \dots \quad (3)$$

令原始正交试验设计法得到的极差值为 j_1, j_2, \dots, j_n , 计算改进的考虑到量纲统一化正交试验设计极差值为

$$J_n = q_n \cdot j_n \quad (4)$$

假设某个影响因素的水平值为 S_1, S_2, \dots, S_n , 利用式(5)计算最后改进后的极差值 J_i :

$$J_i = \frac{J_n}{S_n - S_1} \quad (5)$$

4 大型弃土场边坡工程实例分析

4.1 郑家垭隧道进口弃土场工程地质条件

郑家垭隧道进口弃土场位于宜昌至巴东线 ZK126+533 处,临近咸池沟大桥,该渣场占地 85 亩(约 5.67ha²),设计弃土场 100 万 m³,堆积材料主要为粉砂质泥岩和长石石英砂岩。除郑家垭隧道进口弃土场外,宜巴高速沿线尚有 10 余处与其规模相当的山区弃土场,这些弃土场一旦发生滑动破坏,将给工程带来重大损失。

4.2 实验区域边坡稳定性敏感因素的改进正交试验分析

正交试验设计法分析的 6 种因素是:黏聚力 c 、内摩擦角 φ 、容重 γ 、坡率 m 、边坡高度 h 和剖面形态 p 。通过一系列试验得到弃土土体的黏聚力、摩擦角、体积模量、剪切模量和土体密度分别为 0、40.8°、44.68MPa、21.86MPa、2.14×10³kg/m³。根据上述参数进行设计各个因素相应的水平值,并根据正交试验表设计实验方案,运用 Flac3d 数值模拟软件分别计算多种组合下边坡的稳定性系数及其均值。

(1) 建立如图 1 所示的弃土边坡的基本设计模型,其基本参数为坡率 1:1.5,坡高 5m,土体密度 2.14×10³kg/m³,内摩擦角 40.8°,黏聚力 0,坡面分级为 1 级。

(2) 根据 6 因素 5 水平正交试验表 $L_{25}(5^6)$, 每种影响因素各取 5 个水平值。影响因素的水平值取值是在该区域弃土场的拟设计参数坡率为 1:1.25,坡高 5m,以及实验得到的物

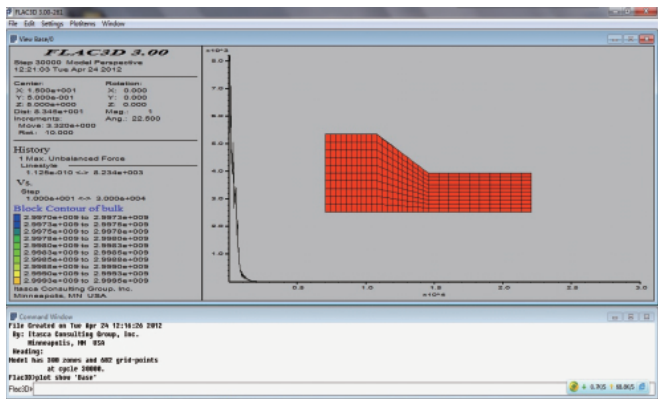


图 1 弃土边坡的基本设计模型

Fig. 1 Basic design model for the slope of spoil field

理力学参数的基础上加以取值。由设计文件可知,该区域内弃土场的边坡设计坡率基本为 1:1、1:1.25、1:2,坡高约为 5m。坡面分级根据该区域弃土场拟设计最高分级数 5 级进行设计。参考设计参数、试验参数及相关文献后,影响因素水平取值如表 1 所示。计算 25 种组合下边坡稳定性系数如表 2 所示。对得到的 25 个边坡稳定性安全系数 F_s 数据进行处理,得到其稳定性系数均值(表 3),极差排序为: $\varphi > \gamma > m > c > p > h$ 。

表 1 影响因素水平表

Table 1 Level table of influential factors

水平	因素					
	m	h/m	$\varphi/(\circ)$	c/kPa	$p/$ 台阶数	$\gamma/(kN \cdot m^3)$
1	1:1	3	25	1	1	18.1
2	1:1.25	4	30	2	2	19.1
3	1:1.5	5	35	3	3	21.1
4	1:1.75	6	38	4	4	22.1
5	1:2	7	40.8	5	5	23.1

(3) 运用灰色关联法计算时,以边坡稳定性各影响因素(黏聚力、内摩擦角、容重、边坡角、边坡高度、剖面形态等)为比较列 $X, X=[x_1, x_2, \dots, x_m]^T$, 相应的边坡安全系数作为参考列 $Y=[y_1, y_2, \dots, y_m]^T$, 计算得到 Y 矩阵为

$$Y = \begin{pmatrix} 1.43 & 1.57 & 1.7 & 1.82 & 1.93 \\ 0.62 & 0.79 & 0.98 & 1.19 & 1.47 \\ 1.35 & 1.34 & 1.33 & 1.32 & 1.31 \\ 1.02 & 1.17 & 1.33 & 1.51 & 1.69 \\ 1.51 & 1.42 & 1.33 & 1.24 & 0.76 \\ 1.33 & 1.51 & 1.7 & 1.86 & 2.05 \end{pmatrix}$$

矩阵每行数据依次为 $c, \varphi, \gamma, m, h, p$ 对应不同水平值的边坡安全系数。由于上述各因素的数量纲不同且数值相差较大,不具可比性,因此利用式(6)对 X_i, Y_i 进行数值变换:

$$X'_i(j) = \frac{X_i(j) - \min X_i(j)}{\max X_i(j) - \min X_i(j)} \quad (6)$$

由式(7)得到差异序列矩阵 Δ :

$$\Delta_j = |Y'_i(j) - X'_i(j)| \quad (7)$$

表 2 正交试验计算方案和结果

Table 2 Calculation schemes and results of orthogonal tests

试验号	m	h/m	$\varphi/(\circ)$	c/kPa	$p/$ 台阶数	$\gamma/(kN \cdot m^3)$	F_s
1	1	1	1	1	1	1	0.85
2	1	2	2	2	2	2	1.22
3	1	3	3	3	3	3	1.77
4	1	4	4	4	4	4	2
5	1	5	5	5	5	5	2.22
6	2	1	2	3	4	5	2.04
7	2	2	3	4	5	1	2.85
8	2	3	4	5	1	2	1.94
9	2	4	5	1	2	3	1.64
10	2	5	1	2	3	4	0.9
11	3	1	3	5	2	4	2.75
12	3	2	4	1	3	5	2.15
13	3	3	5	2	4	1	2.6
14	3	4	1	3	5	2	0.5
15	3	5	2	4	1	3	0.46
16	4	1	4	2	5	3	0.78
17	4	2	5	3	1	4	2.35
18	4	3	1	4	2	5	1.33
19	4	4	2	5	3	1	1.79
20	4	5	3	1	4	2	1.89
21	5	1	5	4	3	2	3.96
22	5	2	1	5	4	3	1.99
23	5	3	2	1	5	4	1.7
24	5	4	3	2	1	5	1.84
25	5	5	4	3	2	1	2.34

表 3 正交试验稳定性系数均值

Table 3 Mean coefficient of stability for the orthogonal tests

项目	m	h/m	$\varphi/(\circ)$	c/kPa	$p/$ 台阶数	$\gamma/(kN \cdot m^3)$
K_{1j}	1.612	2.076	1.114	1.646	1.488	2.086
K_{2j}	1.874	2.112	1.442	1.468	1.856	1.902
K_{3j}	1.692	1.868	2.22	1.8	2.114	1.328
K_{4j}	1.628	1.554	1.842	2.12	2.104	1.94
K_{5j}	2.366	1.562	2.554	2.138	1.61	1.916
极差	0.754	0.558	1.44	0.67	0.626	0.758

并通过式(8)在差异序列矩阵 Δ 中找出最大值与最小值:

$$\Delta_{\max} = \max(\Delta_j) \quad \Delta_{\min} = \min(\Delta_j) \quad (8)$$

可得 $\Delta_{\max}=1, \Delta_{\min}=0$ 。最后,由式(9)求得关联系数:

$$\gamma_j = \frac{\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}}{\Delta_j + \xi \Delta_{\max}} \quad (9)$$

其中, ξ 为分辨系数,其作用是提高关联系数之间的差异显著性, $\xi \in [0, 1]$, 一般情况下可取 $\xi=0.5$ 。

由于关联系数的个数较多,信息比较分散不便比较,因此常求其平均值作为关联度,作为影响因素关联性的比较。即关联度为

$$A = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \gamma_j \quad (10)$$

依次得到的因素 $c, \varphi, \gamma, m, h, p$ 的灰关联度矩阵为

$$A=[0.962, 0.946, 0.49, 0.508, 0.536, 0.992]$$

通过灰关联度比较,各因素敏感性为 $p > c > \varphi > h > m > \gamma$ 。

(4) 运用式(3)和式(5)计算得到各影响因素的权重值,两次改进后的极差值如表4所示。根据第二次改进得到的极差值对上述因素进行排序为 $c > p > \varphi > h > \gamma > m$ 。

表4 权重值和改进后的极差值

Table 4 Weights and the improved poor values

项目	$m/(\circ)$	h/m	$\varphi/(\circ)$	c/kPa	$p/\text{台阶数}$	$\gamma/(kN \cdot m^3)$
权重	0.115	0.121	0.213	0.217	0.224	0.110
改进后的 J_n	0.0864	0.0674	0.3072	0.1454	0.14	0.0838
改进后的 J_e	0.0047	0.0169	0.0194	0.0363	0.035	0.0167

(5) 为了判断该改进方法是否合理,本实验中另外采用了主成分分析法对弃土场的边坡稳定性敏感因素进行分析。以对比改进的正交实验设计法的分析结果。

主成分分析法中的样本以表3中通过正交实验设计法得到的 K 值为指标数据矩阵 X ,同时为了消除指标间不同量纲的影响,运用式(11)对 X 进行标准化处理。

$$X_i^* = \frac{X_i - \mu_i}{\sqrt{\sigma_{ii}}} \quad i=1, 2, \dots, p \quad (11)$$

其中, $\mu_i = E(X_i), \sigma_{ii} = \text{var}(X_i)$ 。

样本的协方差矩阵 S 或者样本相关系数矩阵 R 分别为

$$S = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (X_{ik} - X_i)(X_{jk} - X_j)^T \quad (12)$$

$$R = (r_{ij})_{p \times p} = \left[\frac{s_{ii}}{\sqrt{s_{ii} s_{jj}}} \right]$$

其中,

$$\bar{X} = (\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_p)^T \quad \bar{X}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{ij} \quad j=1, 2, \dots, p$$

$$s_{ij} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_{ii} - \bar{X}_i)(X_{ij} - \bar{X}_j) \quad i, j=1, 2, \dots, p$$

然后利用 Matlab 数学工具求得样本相关系数矩阵 R 归一化后的特征向量 e 和特征值 λ ,并由式(13)计算第 k 个主成分的贡献率,前 m 个主成分累计贡献率。累计贡献率表明前 m 个主成分 Y_1, Y_2, \dots, Y_m ,综合提供 X_1, X_2, \dots, X_p 中信息的能力。若 m 个主成分的累计贡献率超过 85%,认为前 m 个主成分基本包含了原来指标信息。采用主成分分析法计算主成分的贡献率及累计贡献率的值见表5。

表5 主成分贡献率和累计贡献率

Table 5 Contribution rate and cumulative contribution rate of the principal components

主成分	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6
贡献率/%	0.511	0.304	0.151	0.034	0	0
累计贡献率/%	51.1	81.5	96.6	100	100	100

$$K_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^p \lambda_i} \quad G_i = \frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i}{\sum_{i=1}^p \lambda_i} \quad (13)$$

最后由下式计算综合评价指数 Z ,

$$Z = \sum_{i=1}^m K_i Y_i \quad (14)$$

其中, m 为累计贡献率达到 85% 以上的最小主成分个数。

由式(14)计算得到的综合评价指数为

$$Z = -0.05867X_1 - 0.29943X_2 + 0.239976X_3 + 0.281997X_4 + 0.323345X_5 - 0.205X_6$$

根据综合评价指数判断各个影响因素的敏感性大小,综合评价指数越大,代表该因素对于大型弃土场的边坡稳定性影响越大。其中 X_1, X_2, \dots, X_6 的前面系数依次代表坡率 m 、边坡高度 h 、内摩擦角 φ 、黏聚力 c 、剖面形态 p 和容重 γ 的评价指数。通过综合评价指数排序可知,6种影响因素的敏感性为 $p > h > c > \varphi > \gamma > m$ 。

分析可知剖面形态、坡高、黏聚力、摩擦角等因素对于该区域大型弃土场边坡的稳定性影响最为敏感,而容重、坡率对稳定性影响的敏感性小。该分析结果与改进的正交实验设计法、灰色关联法基本一致。因此,可以认为坡滑面处岩土体的强度参数以及边坡的临空面形态是弃土场边坡稳定性影响因素中的较敏感因素,容重和边坡角是较次要敏感因素。在进行该区域弃土场边坡稳定性评价时,坡体形态设计、黏聚力及内摩擦角的取值非常重要,在尽可能地通过现场试验和室内试验准确地获得岩土体的力学参数的基础上,合理设计边坡坡高、临空面形状来提高边坡稳定性。

通过对比上述灰色关联法、主成分分析法的分析结果发现,改进的正交实验设计法比常规的正交实验设计法得到的结果更加准确,充分证明了改进的正交实验设计法的合理性和可靠性。

5 结论

本文结合宜巴高速公路郑家垭隧道进口弃土场实例,运用基于 Flac3d 的改进正交设计法对该区域弃土场边坡稳定性的6种影响因素进行了分析,找到影响该处边坡稳定性的敏感因素。得到的结论如下。

(1) 与灰色关联法、主成分分析法分析对比发现,改进的正交实验设计法比常规正交实验设计法得到的结果更加准确,充分证明改进的正交实验设计法的合理性和可靠性。

(2) 由于主成分分析法、灰色关联法、改进正交实验设计法的计算分析原理不同,因此多种方法得到分析结果排序不完全一致是合理的。但通过分析结果发现:剖面形态、坡高、黏聚力、摩擦角等因素在排序时排在前面,容重、坡率的影响排在后面,因此可以把分析结果归纳为:敏感因素、次敏感因素两种类型,对于弃土场设计和防护仍具指导意义。

(3) 改进的分析方法得到的分析结果与灰色关联法、主成分分析的计算结果大致相同,均为边坡滑面处岩土体的强度参数以及边坡的临空面形态对弃土场边坡稳定性影响较大,容重和边坡角对弃土场边坡稳定性影响较小。

(4) 进行郑家垭隧道出口区域中的弃土场边坡设计时,坡体形态设计及黏聚力、内摩擦角的取值非常重要,在尽可能地通过现场试验和室内试验准确获得岩土体力学参数的基础上,合理设计边坡坡高、临空面形状提高边坡稳定性。

参考文献 (References)

- [1] 何凡,尹婧,王昭艳,等.公路弃土场土壤侵蚀特点及其生态修复对策——以银武路同心至固原段为例 [C]. 第二届全国水土保持生态修复学术研讨会,西安,2009-09-25—29.
He Fan, Yin Jing, Wang Zhaoyan, et al. The soil erosion characteristics and the ecological rehabilitation countermeasures of the road dumping sites—for example the road from Yinwu to Guyuan [C]. The Second National Ecological Rehabilitation Symposiums, Xi'an, September 25-29, 2009.
- [2] 何斌.山区公路弃土场的工程治理与社会效益 [J]. 公路交通科技, 2009, 57(9): 190-192.
He Bin. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2009, 57(9): 190-192.
- [3] 陈中月,王志峰,李勇.高速公路弃土场综合设计与方法[J]. 工程与建设, 2006, 20(5): 450-452.
Chen Zhongyue, Wang Zhifeng, Li Yong. *Engineering and Construction*, 2006, 20(5): 450-452.
- [4] 李志福,王英杰.南水北调中线弃土弃渣场生态修复初探 [J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(6): 414-416.
Li Zhifu, Wang Yingjie. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2009, 7(6): 414-416.
- [5] 雷学东,王薇.公路建设中取、弃土场水土流失的防治措施探讨[J]. 科技风, 2008(9): 23.
Lei Xuedong, Wang Wei. *Technology Wind*, 2008(9): 23.
- [6] 雷功,韦军宏.山区道路工程中弃土场的水土保护研究[J]. 科学之友, 2009(11): 39-42.
Lei Gong, Wei Junhong. *Friends of Science Amateurs*, 2009(11): 39-42.
- [7] 周连兄,赵方莹,侯魏,等.公路弃渣处理及渣场生态建设技术探讨[J]. 中国水土保持, 2010(1): 57-58.
Zhou Lianxiong, Zhao Fangying, Hou Wei, et al. *Soil and Water Conservation in China*, 2010(1): 57-58.
- [8] 陈谦应.堤坡可靠性设计极限状态方程及参数敏感性分析[J]. 岩土力

学, 1995, 16(3): 13-21.

Chen Qianying. *Rock and Soil Mechanics*, 1995, 16(3): 13-21.

- [9] 吴振君,王水林,汤华,等.一种新的边坡稳定性因素敏感性分析方法——可靠度分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 2050-2055.
Wu Zhenjun, Wang Shuilin, Tang Hua, et al. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(10): 2050-2055.
- [10] 杨和雄,王良元.敏感性分析及其模糊方法 [J]. 南京邮电学院学报:自然科学版, 1998, 18(1): 99-101.
Yang Hexiong, Wang Liangyuan. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition*, 1998, 18(1): 99-101.
- [11] 倪恒,刘佑荣,龙治国.正交设计在滑坡敏感性分析中的应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 989-992.
Ni Heng, Liu Yourong, Long Zhiguo. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(7): 989-992.
- [12] 陈高峰,程圣国,卢应发,等.基于均匀设计的边坡稳定性敏感性分析[J]. 水利学报, 2007, 37(11): 1397-1401.
Chen Gaofeng, Cheng Shengguo, Lu Yingfa, et al. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 37(11): 1397-1401.
- [13] 张旭辉,龚晓南,徐日庆.边坡稳定影响因素敏感性的正交法计算分析[J]. 中国公路学报, 2003, 16(1): 36-39.
Zhang Xuhui, Gong Xiaonan, Xu Riqing. *China Journal of Highway and Transport*, 2003, 16(1): 36-39.
- [14] 夏元友,熊海丰.边坡稳定性影响因素敏感性人工神经网络分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2703-2707.
Xia Yuanyou, Xiong Haifeng. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(16): 2703-2707.
- [15] 方开泰,马长兴.正交与均匀试验设计 [M]. 北京:科学技术出版社, 2001.
Fang Kaitai, Ma Changxing. *Orthogonal and uniform experiment design* [M]. Beijing: Science and Technology Press, 2001.
- [16] 邓聚龙.灰理论基础[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2002.
Deng Julong. *The foundation of grey theory* [M]. Wuhan: Huazhong Science and Technology Press, 2002.
- [17] 陈志波,简文彬.边坡稳定性影响因素敏感性灰色关联分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2006, 26(4): 473-476.
Chen Zhibo, Jian Wenbin. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2006, 26(4): 473-476.
- [18] 陈新民,罗国煜.基于经验的边坡稳定性灰色系统分析与评价[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 638-641.
Chen Xinmin, Luo Guoyu. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, 21(5): 638-641.

(责任编辑 胡少卿,朱宇)

《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约 2000 字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿邮箱:kjdbbjb@cast.org.cn。